

О. С. Новикова, А. Ю. Волков
Институт физики металлов УрО РАН,
г. Екатеринбург
А. Е. Костина
Уральский федеральный университет,
г. Екатеринбург
e-mail: alina_30_93@mail.ru

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ДОБАВОК ПАЛЛАДИЯ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ

Изучены физико-механические свойства сплавов Cu-Pd с содержанием палладия до 10 масс.%. Показано, что легирование меди палладием повышает предел текучести примерно на 150 МПа и снижает электропроводность сплавов.

Ключевые слова: сплавы меди, физические и механические свойства, упрочнение.

Physico-mechanical properties of the Cu-Pd alloys with palladium content up to 10 wt.% have been studied. Alloying copper with palladium was shown to increase yield strength by approximately 150 MPa and decrease electrical conductivity of the alloys.

Key words: copper alloys, physical and mechanical properties, strengthening

Медь и ее сплавы широко используются в промышленности в качестве проводниковых материалов в различных электрических приборах и электронных устройствах [1]. Чтобы уменьшить размер и вес изделий, сплавы должны обладать низким значением электросопротивления (высокой электропроводностью), а также довольно высокими прочностными свойствами без потери обрабатываемости (пластичности) [2]. Одним из способов упрочнения меди является легирование. Выбор легирующей добавки для получения электропроводного материала на основе меди с повышенными прочностными свойствами весьма ограничен. К примеру, добавка к меди даже небольшого количества магния приводит к резкому повышению прочностных свойств за счет твердорастворного упрочнения. Электропроводность сплавов медь-магний также велика. На практике электропроводность измеряется в процентах IACS (International Annealed Copper Standard, что можно перевести как «Международный стандарт по отожженной меди»). Это единица измерения проводимости, используемая для сравнения электрических проводников с традиционными медными.

Таким образом, проводимость любого проводника указывается в процентах от электропроводности чистой меди. Сплав Cu-0,7 масс.% Mg имеет электропроводность 75 % IACS. Однако коррозионные свойства сплава Cu-Mg хуже, чем у чистой меди [2]. Требуется найти элемент, который формирует с медью твердый раствор и при этом повышает ее коррозионную стойкость. Одним из таких элементов является палладий, который образует с медью непрерывный ряд твердых растворов [3] и повышает температуру рекристаллизации меди, что положительным образом влияет на термическую стабильность структуры. Сплавы медь-палладий с малым содержанием палладия (менее 11 масс.%) ранее практически не исследовались. Однако именно эти составы представляют наибольший интерес с точки зрения их практических приложений в качестве токопроводящих материалов.

Целью данной работы является изучение микроструктуры, механических и электрических свойств сплавов медь-палладий с содержанием палладия менее 10 масс.%.

Для проведения исследований было выплавлено шесть сплавов Cu-Pd. Результаты рентгеновского микроанализа (Superprobe JCHA-733, ускоряющее напряжение 25 кВ, ток зонда 50 нА) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Состав исследуемых сплавов Cu-Pd

№ сплава	масс.% палладия	ат.% палладия
1	0,8	0,5
2	1,5	0,9
3	2,4	1,4
4	5	3,0
5	7,5	4,6
6	9,5	5,9

Выплавка сплавов производилась из меди и палладия чистотой 99,98 % в вакууме не хуже 10^{-2} Па методом двойного переплава с разливкой в графитовый тигель. Слитки диаметром 8 мм гомогенизировались в течение 3 ч при температуре 850 °С, закаливались в воду и подвергались механо-термическому переделу в виде последовательных операций, включающих выдержку в течение 1 ч при температуре 700 °С с закалкой в воду и дальнейшую деформацию волочением на 90 %.

В работе исследовались образцы двух видов: проволока диаметром 0,22 мм (для резистометрии) и диаметром 1,5 мм (для механических испытаний на растяжение). Для измерения удельного сопротивления образцов использовался стандартный четырехконтактный метод. Механические испытания на разрыв проводились на разрывной машине ZD 10/90 при скорости растяжения 3 мм/мин., длина рабочей части образцов составляла 30 мм.

На рис. 1 приведена зависимость удельного электросопротивления исследуемых сплавов медь-палладий от содержания палладия, а также указаны величины электросопротивления для сплавов Cu-10 ат.% Pd (15,7 масс.%) и Cu-11 ат.% Pd (17,1 масс.%) [4, 5].

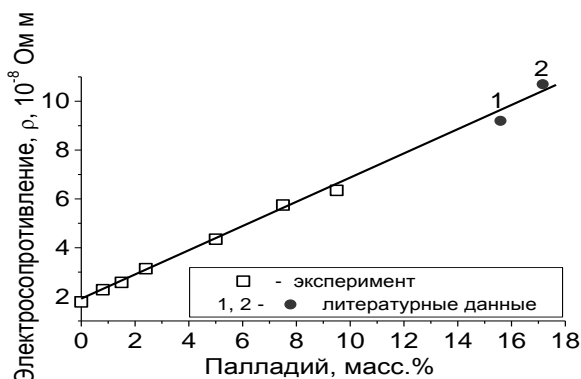


Рис. 1. Концентрационная зависимость электросопротивления образцов сплавов Cu-Pd. Цифрами 1 и 2 обозначены данные из [4] и [5], соответственно

С увеличением содержания палладия наблюдается рост удельного электросопротивления сплавов Cu-Pd (рис. 1). Это хорошо согласуется с литературными данными [4, 5]: значения электросопротивления, полученные в данной работе и построенные по литературным данным, хорошо укладываются на одну прямую. Из данных рис. 1 следует, что электрическая проводимость меняется от 78 % IACS для сплава 1 до 28 % IACS для сплава 6.

На рис. 2. показана концентрационная зависимость предела текучести предварительно деформированных на 90 % образцов сплавов Cu-Pd от содержания палладия. Предел текучести исследуемых сплавов выше, чем у чистой меди, и его величина растет с увеличением содержания палладия, что является результатом твердорастворного упрочнения.

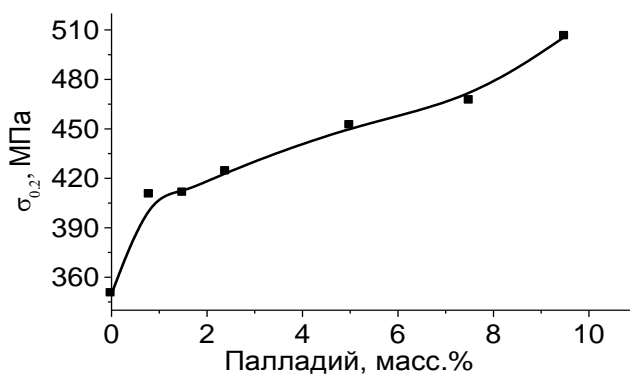


Рис. 2. Зависимость предела текучести предварительно деформированных на $\varepsilon = 90$ % образцов сплавов Cu-Pd от содержания палладия

Наблюдается увеличение предела текучести $\sigma_{0,2}$ от 350 МПа для чистой меди до 500 МПа для сплава 6.

Также были выполнены опыты по введению серебра в исследованные сплавы. Проведенные исследования позволили установить, что дополнительное легирование серебром сплавов системы Cu-Pd приводит к дальнейшему повышению прочностных свойств, поскольку совмещаются два механизма упрочнения: твердорастворный (рис. 2) и дисперсионное упрочнение за счет выделения второй фазы на основе серебра. Таким образом, сплавы меди с малыми добавками палладия и серебра представляют очевидный интерес для практических приложений, так как имеют повышенные прочностные свойства, удовлетворительную электропроводность и более высокую температуру рекристаллизации по сравнению с чистой медью.

При сравнении результатов, представленных на графике для сплава Cu-5Pd-5Ag (рис. 3) и литературных данных для чистой меди [6], можно отметить, что предел текучести исследуемого сплава на 250 МПа выше. Кроме того, благодаря добавке палладия температура рекристаллизации у сплава Cu-5Pd-5Ag по сравнению с чистой медью выше на 200°.

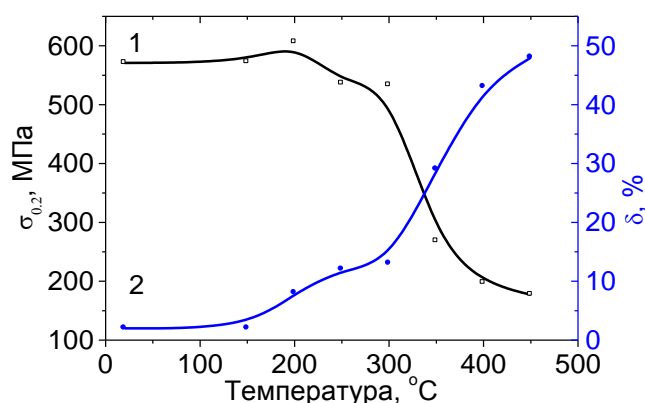


Рис. 3. Зависимости предела текучести $\sigma_{0,2}$ (кривая 1) и относительного удлинения δ (2) от температуры заковки образцов сплава Cu-5Pd-5Ag, предварительно деформированных на 90 %. Время выдержки при каждой температуре – 1 ч

Выводы

1. При легировании меди малыми добавками палладия наблюдается линейный рост удельного электросопротивления от $\rho = 1,78 \times 10^{-8}$ Ом·м для меди до $\rho = 6,35 \times 10^{-8}$ Ом·м для сплава 6 с содержанием палладия 9,5 масс.%.

2. Добавка даже 0,8 масс% палладия повышает предел текучести меди на 20 %. Предел текучести исследуемого сплава 6 выше, чем у чистой меди примерно на 150 МПа.

3. Для выбора сплава с оптимальным набором прочностных и резистометрических свойств следует провести дополнительное исследование.

Список литературы

1. *Lu K.* The Future of Metals // *Science*. 2010. V. 328. P. 319–320.
2. *Maki K.* Solid-solution copper alloys with high strength and high electrical conductivity / K. Maki, Y. Ito, H. Matsunaga, H. Mori // *Scripta Materialia*. 2013. V. 68. P. 777–780.
3. *Subramanian P. R.* Cu-Pd (Copper-Palladium) / P. R. Subramanian, D. E. Laughlin // *J. of Phase Equilibria*. 1991. V. 12. № 2. P. 231–243.
4. *Taylor R.* Transformation in the copper-palladium alloys / R. Taylor // *J. Inst. Met.* 1934. V. 54. № 1. P. 255–272.
5. *Svensson B.* Magnetische Suszeptibilität und elektrischer Widerstand der Mischkristallreihen PdAg und PdCu / B. Svensson // *Annalen der Physik*. 1932. B. 14. № 5. S. 699–711.
6. *Осинцев О. Е.* Медь и ее сплавы : справочник / О. Е. Осинцев, В. Н. Федоров. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.